Untersuchungen an Kurzwellenröhren

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde

der Hohen Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Bayer. Friedrich-Alexanders-Universität
Erlangen

vorgelegt von

Hugo Collenbusch
aus Ihmerterbach i. Westf.

Tag der mündlichen Prüfung: 2. März 1931

1 9 3 2

Johann Ambrosius Barth in Leipzig

1932:162

Referent: Herr Priv.-Doz. Dr. K. Kohl
Korreferent: Herr Prof. Dr. B. Gudden
Dekan: Herr Prof. Dr. F. Henrich

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Sonderdruck aus „Annalen der Physik“
5. Folge, Band 13, Heft 2. 1932

Printed in Germany

Druck von Metzger & Wittig in Leipzig 42

Inhaltsübersicht: Einleitung. — I. Experimenteller Teil: 1. Experimentelle Fragestellungen; 2. Senderanordnung; 3. Schaltung und verwendete Apparate; 4. Meßanordnung zur Bestimmung der Schwingleistung; 5. Meßanordnung zur Bestimmung der Wellenlänge; 6. Untersuchte Röhren; 7. Die auftretenden Wellen, ihre Polarisation und Energieverteilung; 8. Messungen an Röhren mit Lecherdrahtschwingungen: a) Orientierende Messungen; b) Messungen mit der Röhre Nr. 241; c) Versuche mit Röhren Nr. 240, 249; 9. Messungen an Röhren mit Spiralenschwingungen; 10. Weitere Messungen an Röhren mit Spiralenschwingungen; 11. Weitere Messungen über den Einfluß der Glühelektronenemission; 12. Versuche mit Glühkathoden im Gitteranodenraum; 13. Schwingungserzeugung mit Zweielektrodenröhren im homogenen Magnetfeld: Einleitung; a) Senderanordnung; b) Ergebnisse orientierender Messungen; c) Messungen an der Röhre Nr. 221. — II. Zusammenfassende und theoretische Betrachtungen: 1. Die zur Erregung kommenden Schwinggebilde; 2. Die für die Schwingungserzeugung charakteristischen Befunde: a) Der auftretende Anodenstrom; b) Errechnete Laufzeiten und Schwingungsdauern; 3. Die auftretenden Wellenlängenänderungen durch die Betriebsdaten: a) Die Abhängigkeit von der Emission; b) Die Abhängigkeit von den Spannungen; 4. Die Schwingungen im Magnetfeld. — Zusammenfassung und Schluß.

Einleitung

Die vorliegende Arbeit stellt einen weiteren Beitrag zu den Untersuchungen über die Erzeugung von Ultrakurzwellen dar, die in den letzten Jahren von K. Kohl in Erlangen in Zusammenarbeit mit der Firma Tekade Nürnberg in Angriff genommen wurden. Die Meßergebnisse beziehen sich auf eine Auswahl charakteristischer Kurzwellenröhren nach K. Kohl, bestehend aus Kathode, Gitter und Anode in der Barkhausenschaltung bzw. Zweielektrodenröhren mit zusätzlichem Magnetfeld.

Ziel der experimentellen Arbeit war es, einerseits einen Beitrag zur Erklärung des die Schwingungen erzeugenden Elektronenmechanismus zu liefern; andererseits mit den gewonnenen Erkenntnissen elektromagnetische Schwingungen möglichst hoher Frequenz zu erzielen und somit das Gebiet der kürzesten ungedämpften Wellen für die mannigfachen Bedürfnisse von Wissenschaft und Praxis zu erschließen.

I. Experimenteller Teil

1. Experimentelle Fragestellungen

Es wurde der Einfluß von Form und Größe der Elektroden auf die erzeugten Schwingungen untersucht. Weiterhin wurde der Gesamteinfluß der Betriebsdaten, nämlich der Heizung der Glühkathode, der Spannungen zwischen den Elektroden bzw. der Magnetfeldstärke auf Wellenlänge und Energie der Schwingungen untersucht. Den Extremwerten der Betriebsdaten für das Auftreten der Schwingungen, nämlich der kleinsten, günstigsten und größten Elektronenemission bzw. kleinsten, günstigsten und größten Spannung an den Elektroden wurde besondere Beachtung geschenkt. Schließlich wurden zusätzliche Glühkathoden und Hilfselektroden in die Röhren eingebaut, um damit weiteren Aufschluß über den Elektronenmechanismus zu gewinnen.

2. Senderanordnung

Die Senderanordnung für die Dreielektrodenröhren war folgendermaßen getroffen: In die Zuführungen des Heizkreises waren Hochfrequenzdrosseln gelegt. Die Zuleitungen zu Gitter und Anode, deren Länge die Wellenlänge zuweilen mitbestimmte, wurden mit einem Paralleldrahtsystem und beweglicher Abstimmplatte verbunden. Die Metallplatte war wegen der vorhandenen Spannungen unterteilt und durch einen Kurzschlußkondensator für die Hochfrequenz überbrückt. Die Röhren konnten auf diesem Sender sehr leicht ausgewechselt werden.

3. Schaltung und verwendete Apparate

Die verwendete Schaltung ist die sogenannte Bremsfeldschaltung mit positiver Spannung am Gitter und schwach positiver bzw. negativer Spannung an der Anode. Für die Heizung der Glühkathode wurden zur Erzielung möglichster Konstanz Heizbatterien von etwa 50 Amperestunden Kapazität verwendet. Als Spannungsquelle für Gitter und Anode stand eine Hochspannungsbatterie von 600 Volt Spannung zur Verfügung. Außerdem war noch eine Netzgleichspannung von 440 Volt vorhanden.

4. Meßanordnung zur Bestimmung der Schwingleistung

Für die Strahlungsmessung wurde ein abstimmbarer Dipol, in dessen Mitte ein Tantal-Silicium-Detektor angeordnet war, verwendet. Die auftretenden Gleichspannungen am Detektor wurden mittels eines Millivoltmeters von Siemens & Halske gemessen. Der Meßbereich ging bis 15 mV mit 0,1 mV Teilung. Nur bei ganz kleinen Strahlleistungen wurde ein Spiegelgalvanometer von wesentlich größerer Empfindlichkeit (1 Teil $= 2{,}04 \cdot 10^{-6}$ Volt) gewählt.

5. Meßanordnung zur Bestimmung der Wellenlänge

Die Wellenlängen wurden mit einem Lecherschen Drahtsystem gemessen. Die Ankoppelung an die Röhre bzw. an den abgestimmten Resonator geschah durch die aufgebogenen Enden des Lechersystems.

Zur möglichst genauen Wellenlängenmessung wurde die günstigste Koppelung zwischen Lechersystem, Röhre und Resonator aufgesucht, bei der die Resonanzlagen möglichst scharf waren. Das Lechersystem wurde möglichst lose mit dem Sender gekoppelt, um eine Rückwirkung zu vermeiden. Die Wellenlänge wurde aus dem Abstand der Resonanzstellen bestimmt; insbesondere konnte durch Auszählen einer größeren Anzahl von Resonanzstellen eine relativ gute Genauigkeit erzielt werden. Die erreichte absolute Genauigkeit betrug 1 mm, bei sorgfältigen Untersuchungen $^1/_{10}$ mm.

6. Untersuchte Röhren

Von den näher vermessenen Röhren sind in Tab. 1 die wichtigsten Abmessungen aufgeführt. Es sind nur Röhren mit zylindrischen Elektroden vermessen worden, da diese die beste Energie lieferten. L bedeutet die Länge des Anodenzylinders, r_0 den Heizfadenradius, r_1 den Gitterradius, r_2 den Anodenradius.

Tabelle 1

Röhre Nr.	L cm	r_0 cm	r_1 cm	r_2 cm	Windungen
240, 241	2,0	0,01	0,1	0,5	kurzgeschl.
249	3,0	0,01	0,15	0,5	„
184, 185	1,5	0,01	0,3	0,75	14 Wdg.
202, 242	1,5	0,01	0,3	0,75	„
199, 221	2,5	0,01	0,45	1,1	„
109	1,5	0,01	0,15	0,4	„
168	1,5	0,01	0,15	0,6	„
279	1,5	0,01	0,15	0,9	„
252	1,5	0,01	0,15	0,9	„
56	—	0,01	0,15	—	—

Das Gitter ist mit Ausnahme von Röhre Nr. 56, deren Spannungselektrode aus zwei Hohlzylindern von 3 mm Durchmesser besteht, von einer Molybdän- bzw. Wolframdrahtspirale gebildet, deren Windungen nur bei den Röhren 240, 241 und 249 metallisch überbrückt sind. Bei den übrigen Röhren besteht das Gitter im Anodenzylinder aus einer nicht überbrückten Spirale, die außerhalb der Anode durch einen Nickelbügel kurzgeschlossen ist. Der geschlossene Gitterspiralenkreis konnte in seiner Grund- und in einem Falle im Magnetfeld auch in seiner Oberwelle erregt werden. War die Spirale in der Mitte unterbrochen, so trat eine etwa doppelt so lange Welle auf. Es gelang, solche Drahtkreise bis herab zu einer Wellenlänge von 4,7 cm ungedämpft zu erregen. Die Anode war meist aus einem Nickelblechzylinder hergestellt. Die in Tab. 1 aufgeführten Röhren besitzen sämtlich Wolframkathoden, die bei etwa 2 Amp. Heizstromstärke Elektronen auszusenden beginnen.

Wurden die Drahtspiralen dieser Röhren zu Schwingungen im Magnetfeld angeregt, so war die Anode ohne wesentlichen Einfluß; sie wurde deshalb meistens isoliert.

7. Die auftretenden Wellen, ihre Polarisation und Energieverteilung

Wurden die oben beschriebenen Drahtkreise erregt, so war die Welle in der durch den Bügel der Gitterspirale definierten Ebene linear polarisiert. Die Wellenlänge war in diesem Falle durch die Zuleitungen nicht meßbar zu ändern. Die Gitteranodenzuleitung wurde dabei so abgestimmt, daß eine günstige Strahlleistung erzielt wurde. Neben diesen Schwingungen zeigten alle Röhren auch Schwingungen, bei denen die Zuleitungen sowie die durch Gitter und Anode gebildete Kapazität für die Schwingungen maßgebend waren. Die auftretenden Wellen waren meist senkrecht zu obigen polarisiert. Häufig zeigten sich Koppelschwingungen zwischen den oben erwähnten Drahtkreisen und den Zuleitungen, besonders auch den Heizzuleitungen. Die gemessenen Wellen waren dann länger als die Eigenwelle der Spirale und von der Zuleitungslänge etwas abhängig.

Bei allen auf den Zuleitungen auftretenden Schwingungen zeichneten sich ganz besonders diejenigen durch große Energie aus, bei denen die wirksame Betriebskapazität die Kapazität zwischen Gitter und Anode war. Die wirksame Selbstinduktion wurde dann durch die Zuleitung zu diesen beiden Elektroden gebildet (Lechersches Paralleldrahtsystem). Diese Schwingungen wurden auch näher studiert; sie sind im folgenden kurz mit Lecherdrahtschwingungen bezeichnet.

8. Messungen an Röhren mit Lecherdrahtschwingungen

a) Orientierende Messungen

Mit den in der Tab. 1 aufgeführten Röhren Nr. 184, 185, 109 und 199 wurden eine große Reihe orientierender Messungen durchgeführt, insbesondere wurde die Abhängigkeit der erzeugten Wellenlängen von der Lecherdrahtlänge untersucht und ähnliche Ergebnisse wie von Hollmann (6) und Strutt (10) erhalten. Die erzeugten Wellen konnten trotz Nachregulierung der Betriebsdaten nur in einem schmalen Bereich geändert werden. Die Untersuchungen über die Abhängigkeit der Wellenlänge von den Betriebsdaten, der Gitter- und Anodenspannung und der Emission lieferten ganz ähnliche Ergebnisse wie die Messungen von Hornung (7), nur daß entsprechend den kürzeren Wellenlängen kleinere Änderungen gemessen wurden. Abweichend zeigten jedoch einige Röhren, Röhre Nr. 184 und 185, eine Zunahme der Wellenlänge mit steigender Emission.

b) Messungen mit der Röhre Nr. 241

Ein wesentlich breiteres Frequenzband konnte schließlich mit Röhren der Type 241 erzielt werden, die eine sehr

geringe Sockelkapazität und ein Radienverhältnis $\frac{r_2}{r_1} > 2{,}5$ hatten. Mit der Röhre Nr. 241, bei der $\frac{r_2}{r_1} = 5$ war, konnten Wellen von $\lambda = 28$ bis 120 cm lückenlos erzeugt werden.

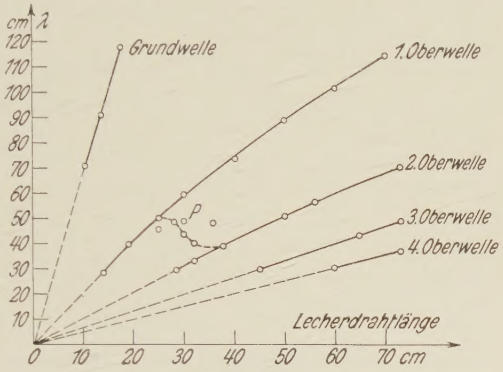

Fig. 1. Röhre Nr. 241. Lecherdrahtschwingung $\lambda = f(L)$ bei bester Angleichung von e_g; e_a; i_e max = 60 mA

Die in Fig. 1 dargestellten Kurven wurden folgendermaßen gemessen: Für jede eingestellte Lecherdrahtlänge wurden die Betriebsdaten auf die günstigste Schwingleistung eingestellt. Bei $\lambda = 60$ cm war die günstigste Emission größer als 60 mA (vgl. Fig. 2). Um die Röhre nicht zu zerstören, wurde diese Emission nicht überschritten. Es gelang auf diese Art, das Lechersystem in der Grundwelle, dann aber auch in Oberwellen bis zur vierten Oberwelle zu erregen.

Mit abnehmender Wellenlänge nahmen die Betriebsdaten der Röhre so zu, daß bei $\lambda = 28$ cm die Grenze der Belastbarkeit erreicht wurde. Die langwellige Grenze war dadurch gegeben, daß mit zunehmender Wellenlänge die Energieaufnahme abnahm. Es wurden nicht nur die Betriebsspannungen sehr klein, sondern auch die günstigste Emission wurde sehr klein und betrug bei $\lambda = 115$ cm nur noch 4 mA.

Es wurde ferner die Energieverteilung innerhalb des Wellenbereiches von $\lambda = 28$—120 cm mit einem jeweils abgestimmten Resonator als Empfänger in konstanter Entfernung (2 m) vom Sender gemessen und festgestellt, daß für $\lambda = 45$ cm ein scharfes Maximum der Strahlungsenergie vorhanden ist.

Waren die Betriebsspannungen der Röhre nicht für die günstigste Strahlleistung eingestellt, so wurde damit zugleich die Wellenlänge verändert. Bei diesen abweichenden Betriebsspannungen traten ebenfalls Energiemaxima auf. Die Wellen für einige derartige Maxima sind in Fig. 1 eingezeichnet (vgl. auch Fig. 8).

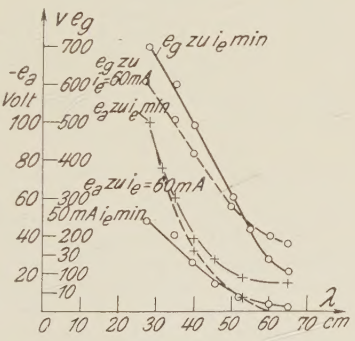

Fig. 2. Röhre Nr. 241. Lecherdrahtschwingung für E max: $e_g = f_1(\lambda)$; $e_a = f_2(\lambda)$; i_e min $f_3(\lambda)$

Fig. 2 gibt die optimalen Betriebsdaten der Röhre Nr. 241 für die Wellen im Bereich von $\lambda = 28$—65 cm an, wie sie gemäß Fig. 1 in Abhängigkeit von der Lecherdrahtlänge erhalten wurden. Dabei be-

deutet i_e min. die Emission, bei der die Röhre zu schwingen beginnt. Die günstigste Gitter- bzw. Anodenspannung ist einmal für die Anfangsemission (ausgezogene Kurven), dann aber für die höchste aufgewandte Emission von 60 mA (gestrichelte Kurven) angegeben. Während die Röhre bei $\lambda = 65$ cm schon bei einer Emission von 2 mA zu schwingen beginnt, beträgt bei $\lambda = 28$ cm die Emission für den Schwingungsbeginn nahezu 50 mA.

Um die Wertpaare von e_g und e_a, bei denen Schwingungen existieren, möglichst vollständig zu erfassen, wurden bei konstanter Wellenlänge und jeweils konstanter Emission einmal die Wertpaare aufgesucht, bei denen die Schwingungen gerade einsetzen, dann die Wertpaare, bei denen die Schwingungsenergie E bei konstantem e_g in Abhängigkeit von e_a ein Maximum wird. Die Kurven $E = 0$ schließen dann das Schwinggebiet ein, das von der erwähnten Kurve E_{max} durchsetzt ist. Da für die kleinste Emission, bei der Schwingungen auftreten nur *ein* Spannungspaar existiert, schrumpft ein solcher Schwingungsbereich mit abnehmender Emission zu einem Punkt zusammen.

In Fig. 3 sind die Kurven $E = 0$, E max, sowie dieser ausgezeichnete Punkt für die Wellenlänge $\lambda = 45$ cm aufgetragen, Wie die Messungen zeigen, liegt ein Bereich bei kleiner Emission meist ganz innerhalb eines Bereiches höherer Emission. Auffällig ist die langgestreckte Form dieser Bereiche. Bei den Kurven in Fig. 3 sind Schwingungen bei einer Gitterspannung von 75 bis 800 Volt bei 60 mA Emission vorhanden. Der Anodenspannungsbereich beträgt etwa nur 50 Volt. Dies deutet auf eine Beziehung zwischen der Laufzeit der Elektronen im Raum Gitter-Anode und der Schwingungsdauer hin.

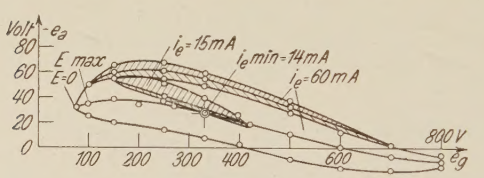

Fig. 3. Röhre Nr. 241. Lecherdrahtschwingung für $L = 22{,}0$ cm; e_g-, e_a-Bereiche für $i_e = \text{const}$

Bei höherer Gitterspannung wird die Anodenspannung positiv, was jedoch keinerlei Unstetigkeiten im Verlaufe der Kurven nach sich zieht. Es zeigt sich weiterhin unmittelbar an der Seite der negativen Anodenspannung anschließend merkwürdigerweise ein zweiter Bereich, der seinerseits eine E max-Kurve aufweist. Bei $\lambda = 60$ cm wurden sogar mehrere solche Bereiche beobachtet.

Die Frage nach den Wellenlängenänderungen innerhalb eines derartigen Bereiches lag nahe. Für die Lecherdrahteinstellung $L = 22{,}0$ cm wurde für die E max-Kurve die Wellenlänge gemessen. Fig. 4 zeigt $\lambda = f(e_g)$ mit nachregulierter Anodenspannung. Energieverlauf und Anodenstrom wurden dabei ebenfalls mit aufgenommen. Das Ergebnis dieser Messungen war, daß in einem Bereich von $e_g = 100$—700 Volt die Wellenlänge konstant bleibt. Es war nur eine kleine Abhängigkeit von der Emission zu verzeichnen, und zwar nimmt hier λ mit zunehmender Emission ab. Wie aus den Kurven zu ersehen ist, nimmt bei positiver

Anode der Anodenstrom stark zu. Bemerkenswert ist ferner, daß die Energie bei positiver Anodenspannung noch ein zweites Maximum besitzt.

Der nächste Schritt war nun, das Verhalten von λ in Abhängigkeit von der Anodenspannung allein zu untersuchen. Es wurde e_g konstant gehalten und $\lambda = f(e_a)$ untersucht (Figg. 5 u. 6). Es zeigten sich folgende Gesetzmäßigkeiten: Die Wellenlänge nimmt mit negativ werdender Anodenspannung und zunehmender Emission ab. Für das Energiemaximum ist die Wellenlängenänderung durch die Emission am kleinsten. Ferner nimmt die Wellenlängenänderung durch die Emission mit steigender Gitterspannung ab (vgl. Figg. 5 und 6). Das Maximum des Anodenstroms liegt bei stärker positiver Anodenspannung als das Maximum der Energie. Das Energiemaximum liegt für die verschiedenen Emissionen beinahe bei der gleichen Anodenspannung.

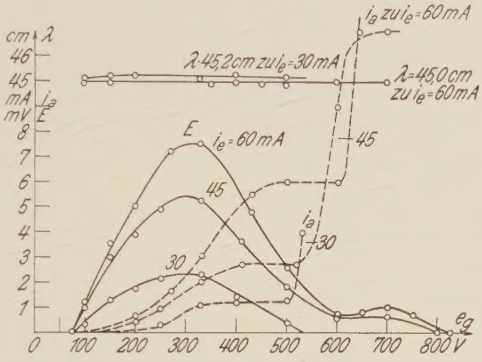

Fig. 4. Röhre Nr. 241. Lecherdrahtschwingung für $L = 22{,}0$ cm; e_a opt $\lambda = f_1(e_g)$; $E = f_2(e_g)$; $i_a = f_3(e_g)$; $i_e = \text{const}$

In Fig. 7 ist für $L = 15$ cm und $e_g = 500$ Volt die Abhängigkeit der

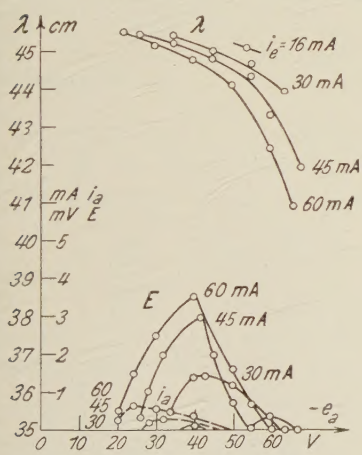

Fig. 5. Röhre Nr. 241. Lecherdrahtschwingung für $L = 22{,}0$ cm; $e_g = 150$ Volt; $\lambda = f_1(e_a)$; $E = f_2(e_a)$; $i_a = f_3(e_a)$; $i_e = \text{const}$

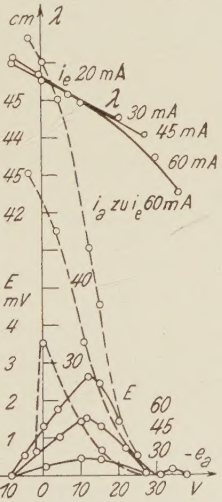

Fig. 6. Röhre Nr. 241. Lecherdrahtschwingung für $L = 22{,}0$ cm; $e_g = 500$ Volt; $\lambda = f_1(e_a)$; $E = f_2(e_a)$; $i_a = f_3(e_a)$; $i_e = \text{const}$

Wellenlänge und der Energie von der Anodenspannung und Emission noch dargestellt. Die Wellenlänge läßt sich nur wenig durch die Betriebsdaten ändern. In dem Spannungsbereich von $e_a = 60$—110 Volt ändert sich λ nur um 5 mm, während bei der gleichen Gitterspannung,

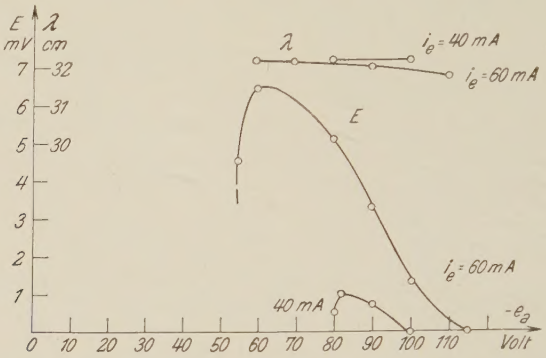

Fig. 7. Röhre Nr. 241. Lecherdrahtschwingung für $L = 15{,}0$ cm; $e_g = 500$ Volt; $\lambda = f_1(e_a)$; $E = f_2(e_a)$; $i_e = \text{const}$

aber größerer Lecherdrahtlänge in Fig. 6 λ sich im Bereich von e_a: + 10 bis − 40 Volt um 35 mm ändert. Die Änderung durch die Emission ist ebenfalls kleiner. λ nimmt wieder mit zunehmender Emission ab. Die Schwingungen reißen ferner bei zu hoher positiver Anodenspannung ab. Das Energiemaximum wandert mit steigender Emission nach positiver Anodenspannung hin. Ein Anodenstrom tritt hier nicht auf.

Die Fig. 8 stellt bei Lecherdrahtlänge $L = 30$ cm bei $e_g = 180$ Volt Energie E, Wellenlänge λ und Anodenstrom i_a in Abhängigkeit

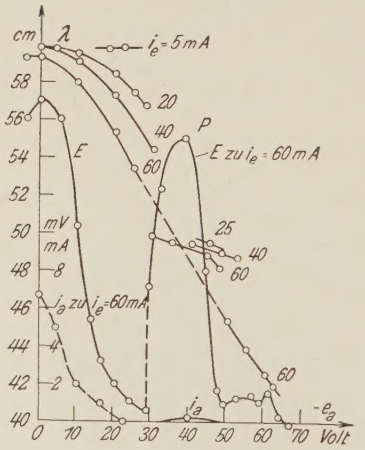

Fig. 8. Röhre Nr. 241. Lecherdrahtschwingung für $L = 30$ cm; $e_g = 180$ Volt; $\lambda = f_1(e_a)$; $E = f_2(e_a)$; $i_a = f_3(e_a)$; $i_e = \text{const}$

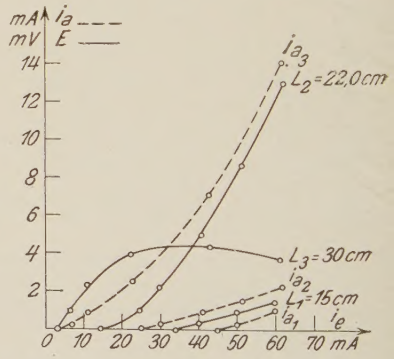

Fig. 9. Röhre Nr. 241. Lecherdrahtschwingung für $L = \text{const}$; $E = f_1(i_e)$; $i_a = f_2(i_e)$; e_g und e_a für E max nachreguliert

von der Anodenspannung e_a dar. Um das Bild nicht zu unübersichtlich zu gestalten, wurde E und i_a nur für $i_e = 60$ mA aufgetragen. Neben dem Energiemaximum, das bei $e_a = 180$ Volt und $i_e = 60$ mA bei einer Anodenspannung um Null liegt, zeigt sich noch ein ausgesprochenes zweites Energiemaximum bei $e_a = -40$ Volt (mit P in Fig. 1 bezeichnet). Die hier auftretende Welle zeigt eine viel geringere Abhängigkeit von e_a und i_e als die normale Lecherdrahtschwingung. Die normale Lecherdrahtwelle ist ganz erheblich durch Emission und Anodenspannung abzuändern. Die rechts vom zweiten Energiemaximum gemessenen Wellen gehören sicher noch zu dem normalen Bereich. Bemerkenswert ist, daß ein Ziehen der Welle durch die Betriebsdaten vom Energiemaximum aus nach kürzerer Wellenlänge leichter und weiter möglich ist, als nach längerer Wellenlänge. Hier pflegen die Schwingungen meist abzureißen.

Um schließlich noch zu zeigen, wie sich die Energieaufnahme der Röhre mit der erzeugten Wellenlänge ändert, sind die Kurven in Fig. 9 aufgenommen. Für die drei Lecherdrahteinstellungen $L = 15$, $L = 22$ und $L = 30$ cm wurden die Leistungen bei den günstigsten Betriebsspannungen in Abhängigkeit von der Emission gemessen. Es zeigte sich folgendes: Die Anfangsemission nimmt mit abnehmender Wellenlänge nahezu linear zu. Der Energieanstieg ist für die kurze Welle $\lambda = 30$ cm mit wachsender Emission gering. Für die energiereichste Welle $\lambda = 45$ cm zeigt die Energiekurve noch eine wachsende Steigung bei $i_e = 60$ mA. Für die längste Welle $\lambda = 60$ cm biegt die Energiekurve schon bei 20 mA um. Es gelingt auch nicht, durch Nachregulierung der Betriebsspannung dies zu verhindern.

Die Messungen mit Röhre Nr. 241 zeigen somit zusammenfassend folgendes Ergebnis:

1. Ein definiertes Schwingsystem, bestehend aus einem Lecherdrahtsystem mit der Röhrenkapazität als Endkapazität, ist in Grund- und Oberschwingungen zu erregen.

2. Die Betriebsdaten müssen der erzeugten Frequenz angepaßt sein.

3. Die Energie besitzt als Funktion der Wellenlänge ein ausgesprochenes Maximum.

4. Die Spannung des Gitters läßt sich für $L =$ konstant bei genügend hoher Emission in einem weiten Bereich ändern, falls nur die Spannung der Anode nachreguliert wird.

5. Eine Wellenlängenänderung durch die Gitterspannung allein konnte hierbei nicht gemessen werden.

6. Die Anodenspannung vermag die erzeugte Welle in erster Linie nach kürzeren Wellen zu verändern. Am kräftigsten gelingt dies bei hoher Elektronenemission.

7. Die beobachtete Wellenlängenänderung durch die Emission allein war gering und nicht eindeutig; die Änderungen können auch durch Potentialänderungen bedingt sein.

8. Die Wellenlängenänderung der Lecherdrahtwelle ist bei der kürzesten erzeugten Welle klein (etwa 7 Proz.) und nimmt mit zunehmender Wellenlänge zu. Bei $\lambda = 60$ cm ist die Wellenlänge um 30 Proz. durch die Betriebsdaten zu ändern.

c) Weitere Versuche mit Lecherdrahtschwingungen

Bei der Röhre Nr. 240, die ganz genau wie die Röhre Nr. 241 gebaut war, zeigte sich außer den beschriebenen Wellenbereichen noch eine kurze Welle von 19 cm bei auffallend kleinen Betriebsdaten. Die Länge der Zuleitungsdrähte zwischen der Röhre und den Heizdrosseln zeigte sich, neben den Gitter- und Anodenzuleitungen für das Zustandekommen der Welle von Einfluß. Waren die Heizzuleitungsdrähte zu kurz, so konnte die Welle überhaupt nicht erregt werden. Aus der Energieverteilung auf den Zuleitungen war ebenfalls die Beteiligung der Heizleitungen an den Schwingungen zu ersehen.

Weiterhin zeigte sich, daß die beobachtete Welle durch die Gitterzuleitung von $\lambda = 17{,}5$—20 cm zu ändern war.

Die e_g-, e_a-Bereiche bei konstanten Lecherdrahtlängen hatten die gleiche Gestalt wie der in Fig. 3 dargestellte Bereich. Auffallend war, daß die Röhre bei sehr kleiner Gitterspannung ($e_g = 100$) Schwingungen zeigte. Die Welle war nahezu konstant innerhalb dieses Bereiches. Als größte Differenz wurden 2 mm gemessen.

Die gleichen Versuche, die mit Röhren Nr. 240 und 241 angestellt wurden, wurden mit Röhre Nr. 249 wiederholt (Dimension der Röhre vgl. Tab. 1). Die Röhre Nr. 249 hat gegenüber den Röhren Nr. 240 und 241 den wesentlichen Unterschied, daß die Anode aus einer durch einen Metallbügel überbrückten Drahtspirale besteht. Auch sind die Elektrodenzylinder vertikal angeordnet. Die Röhre zeigte ein ähnliches Verhalten wie die bisher untersuchten; sie zeigte eine ausgesprochene Lecherdrahtschwingung mit einem Energiemaximum bei $\lambda = 45$ cm, außerdem zeigte sie eine kurze Welle von 22 cm, die wieder nur ganz wenig durch L zu ändern war.

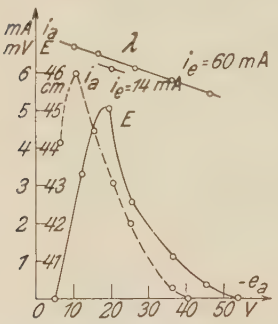

Fig. 10. Röhre Nr. 249. Lecherdrahtschwingung; lange Welle; L opt = 11 cm für $e_g = 220$ Volt; $\lambda = f_1(e_a)$; $E = f_2(e_a)$; $i_a = f_3(e_a)$

Die Röhre wurde in erster Linie wegen der durchbrochenen Anode untersucht. Unter der Annahme, daß die auftretenden Wellenlängenänderungen durch die Betriebsdaten, durch den Einfluß der in dem Raum Gitter–Anode laufenden Elektronen auf die Gitter-Anoden-Kapazität bedingt sind, mußte, falls Gitter und Anode aus Spiralen bestanden, der Einfluß geringer sein. Es mußte sich also bei spiraliger Anode eine geringere Wellenlängenänderung durch die Betriebsdaten zeigen als bei voller Anode. Die Röhre Nr. 249 hatte zufällig den Vorteil, das Strahlungsmaximum ebenfalls bei $\lambda = 45$ cm wie die Röhre Nr. 241 mit voller Anode zu zeigen.

Die Kurven in Fig. 10 zeigen die Bestätigung obiger Vermutung. In einem Spannungsbereich von 50 Volt ändert sich λ nur um 1,5 cm gegenüber 4,5 cm bei Röhre Nr. 241. Außerdem zeigte diese Röhre ebenso wie Röhre Nr. 184 eine Zunahme der Wellenlänge mit wachsender Emission bei negativer Anodenspannung, was auf die Ausbildung stärkerer Raumladungen schließen läßt.

9. Messungen an Röhren mit Spiralenschwingungen

Bei Röhren, die ein nicht überbrücktes Gitter hatten, konnte der aus Gitterspirale und Bügel gebildete geschlossene

Spiralenkreis nach K. Kohl zu Schwingungen angeregt werden. Die Schwingungen waren in der Ebene dieses Drahtkreises linear polarisiert und von den Zuleitungen unabhängig. Ein Spannungsknoten trat in der Mitte des die beiden Enden der Spirale verbindenden Bügels, der zweite Knoten in der Mitte der Spirale auf. Es war kein wesentlicher Unterschied festzustellen, ob die Gleichstromzuleitung zu dem einen oder anderen Knoten geführt war.

Die mit den Röhren Nr. 184 und 185 gemachten Versuche zeigten, daß auch bei den Spiralenschwingungen noch eine Beeinflussung der Wellenlänge durch die Betriebsdaten auftritt, ähnlich wie bei den Röhren mit Lecherdrahtschwingungen.

Die drei Röhren Nr. 109, 185 und 199 (Tabelle 1) wurden ausführlich vermessen. Sie sind gleichartig gebaut. Die Drahtspirale weist 14 Windungen auf. Das Verhältnis der Elektrodenradien r_2/r_1 ist für alle drei Röhren ungefähr gleich 2,5. Sie unterscheiden sich also nur durch die Länge des Drahtkreises und durch die Größe der Elektrodendurchmesser.

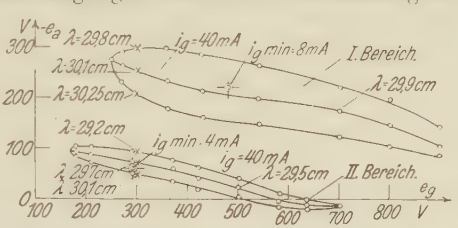

Fig. 11. Röhre Nr. 199. Spiralenschwingung. e_g-, e_a-Bereiche i_e = const

In Fig. 11 sind nur für die Röhre Nr. 199 in der gleichen Weise, wie dies bei Röhre Nr. 241 geschehen ist, die e_g-, e_a-Bereiche bei konstanter Emission aufgenommen. Alle drei Röhren besitzen zwei derartige Bereiche. Es wurden außerdem die Wellenlängen an verschiedenen Stellen der e_g-, e_a-Bereiche gemessen (vgl. Fig. 11). So zeigte sich, daß im zweiten Bereich bei kleinerer Anodenspannung die Wellenlänge im Mittel etwas kürzer ist als im ersten Bereich. Ferner ist die Anfangsemission für den zweiten Bereich kleiner.

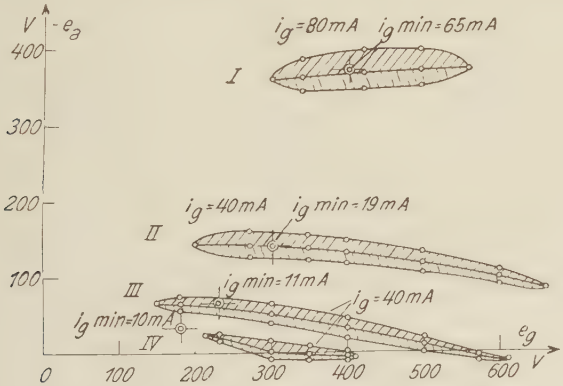

Fig. 12. Röhre Nr. 168. Spiralenschwingung. e_g-, e_a-Bereiche i_e = const; λ = 12,6 cm

Mehr als zwei Bereiche konnten bei den Röhren gefunden werden, bei denen das Verhältnis der Elektrodenradien r_2/r_1 größer als 2,5 war. Die Messungen an einer solchen Röhre sind im folgenden wiedergegeben: Die verwendete Röhre Nr. 168 hatte genau denselben Drahtkreis wie die Röhre Nr. 109, nur war die Anode weiter gehalten. Es war $\frac{r_2}{r_1} = 4$.

In Fig. 12 sind die vier gefundenen Bereiche wiedergegeben. Die Anodenspannung für den ersten Bereich ist schon recht beträchtlich (— 400 Volt). Die Anfangsemission muß auch sehr hoch gehalten sein (etwa 65 mA), um überhaupt noch Schwingungen zu bekommen. Mit zunehmender Ordnungszahl der Bereiche nimmt die Anfangsemission ab. Aus den Kurven in Fig. 12 ist eine Gesetzmäßigkeit für die Anodenspannung zu vermuten.

Trotz der hohen Anfangsemission ist die Energieausbeute im ersten Bereich am besten und nimmt mit steigender Ordnungszahl der Bereiche nahezu linear ab.

10. Weitere Messungen an Röhren mit Spiralenschwingungen

Bei den Versuchen mit Lecherdrahtschwingungen bei Röhre Nr. 241 zeigte sich schon andeutungsweise bei positiver Anode ein zweites Energiemaximum. Noch ausgeprägter zeigen dies die Röhren mit Spiralenschwingungen bei nicht zu weiter Anode. In Fig. 13 sind die beiden Energiemaxima im zweiten Schwingungsbereich der Röhre Nr. 109 dargestellt. Es ist hier die Energie, die optimale Anodenspannung und der Anodenstrom für konstante Emission als Funktion der Gitterspannung aufgenommen. Wird die Anodenspannung positiv, so steigt der Anodenstrom auf ein Vielfaches. Die Energie, die bei der Anodenspannung Null ein Minimum aufweist, nimmt nun bei Positivwerden der Anodenspannung wieder zu. Es ist sogar möglich, falls die Emission nur groß genug gewählt wird, bei positiver Anodenspannung mehr Energie aus der Röhre herauszuholen als dies bei dem gleichen Bereich bei negativer Anodenspannung möglich ist. Bemerkenswert ist noch, daß der bei positiver Anodenspannung auftretende Anodenstrom im Schwingungsfall kleiner ist, als wenn keine Schwingungen vorhanden sind.

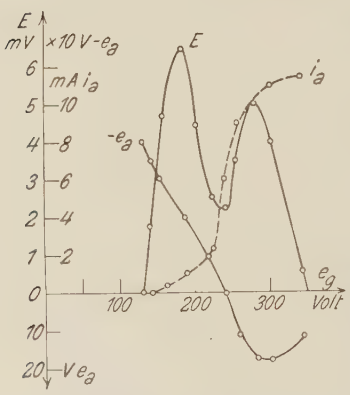

Fig. 13. Röhre Nr. 109. Spiralenschwingung. $\lambda = 14{,}2$ cm. Bereich 2. $E = f_1(e_g)$; e_a opt $= f_2(e_g)$; $i_a = f_3(e_g)$ bei e_a opt; $i_e = 40$ mA

Faßt man die Ergebnisse über die Schwingungen bei positiver Anodenspannung zusammen, so ergibt sich:

1. Schwingungen bei positiver Anodenspannung erscheinen immer zwangsläufig bei hoher Gitterspannung und Emission am Ende eines Schwingungsgebietes bei negativer Anodenspannung; sie scheinen demnach keinen selbständigen positiven Schwingbereich zu bilden.

2. Der Anodenstrom bei positiver Anodenspannung ist im Schwingzustand kleiner als ohne Schwingungen.

3. Die Schwingleistung zeigt außer dem bei negativer Anodenspannung auftretenden Maximum sehr häufig ein zweites Maximum bei positiver Anodenspannung.

11. Weitere Messungen über den Einfluß der Glühelektronenemission

Um den Zusammenhang zwischen Gitterspannung und Emission oder, was das gleiche ist, zwischen Elektronengeschwindigkeit und Elektronendichte zu ersehen, wurden die Kurven in Fig. 14 mit der Röhre Nr. 185 aufgenommen. Die Kurven E = konst. stellen Höhenlinien in den Raum e_g, $i_e - E$ dar. Die Anodenspannung war zweckmäßig für das Maximum der Schwingungen eingestellt, um die Laufzeitbeziehung, die für den Anodenraum erforderlich ist, nach Möglichkeit zu erfüllen. Bei kleiner Gitterspannung sind für e_g = konst. zwei Punkte $E = 0$ zu erhalten. Die Leistung geht also mit steigender Emission über ein Maximum, um wieder auf Null zurückzukehren. Bei hoher Gitterspannung muß die Emission hoch sein, um überhaupt Schwingungen zu erhalten.

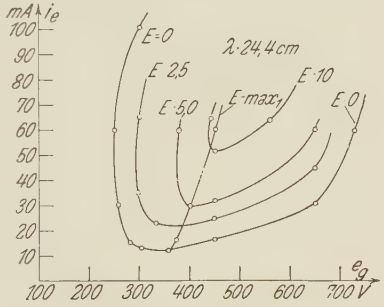

Fig. 14. Röhre Nr. 185. Spiralenschwingung. λ = 24,4 cm; e_g-, i_e-Schwinggebiet; Kurven E = 0 und E = const bei e_a opt

12. Versuche mit Glühkathoden im Gitteranodenraum

Eine wie Röhre Nr. 185 gebaute Röhre mit einer Spiralenschwingung von 24,4 cm wurde mit einer, später mit zwei diametral gegenüberstehenden Glühkathoden in 1 mm Abstand von der Anode versehen (Röhre Nr. 242). Die wichtigsten Ergebnisse dieser Versuche seien hier aufgeführt:

Wurde die eine äußere Kathode allein geheizt, so konnte die Spirale nicht in Schwingungen versetzt werden. Es konnten jedoch bei gleichzeitiger Heizung der zentralen Kathode Schwingungen erhalten werden. Die Schwingungen waren bei einer viel kleineren Emission der zentralen Kathode noch stabil als ohne Emission der äußeren Kathode. So war für den ersten Bereich bei $e_g = 160$ Volt und $e_a = -115$ Volt die kleinste Emission 10 mA. Lieferte die äußere Kathode 10 mA, so konnte mit der Emission der zentralen Kathode bis auf 2 mA zurückgegangen werden, bis die Schwingungen erst aussetzen. Die beiden Kathoden wurden etwa auf gleichem Potential gehalten.

Mit zwei äußeren Kathoden konnten dann auch ohne Beteiligung der zentralen Kathode Schwingungen erregt werden. Die günstigste Gitterspannung betrug hier 220 Volt, die günstigste Anodenspannung — 28 Volt gegenüber den äußeren Kathoden. Die Schwingungen setzten schon bei 8 mA Emission ein. Die Energie war etwa $^1/_{25}$ von derjenigen, die bei Heizung der zentralen Kathode allein bei derselben Emission auftrat.

Rückte man die äußeren Kathoden von der Anode weg, so wurde die Leistung geringer. Waren die äußeren Kathoden in der Mitte zwischen Spannungselektrode und Anode angebracht, so konnte mit ihnen die Spirale nicht mehr zu Schwingungen erregt werden. Wurden diese äußeren Kathoden beim Vorhandensein von Schwingungen zusammen mit der zentralen Kathode geheizt, so setzte ihre Elektronenemission die Schwingleistung herab; war ihre Elektronenemission sehr hoch, so konnten die Schwingungen ausgelöscht werden.

13. Schwingungserzeugung mit Zweielektrodenröhren im homogenen Magnetfeld

Einleitung

Wie von Zacek (11) erstmalig gezeigt wurde, gelingt es bei Zweielektrodenröhren unter Zuhilfenahme eines homogenen Magnetfeldes ebenfalls, ungedämpfte elektromagnetische Schwingungen hoher Frequenz zu erzeugen. Die so erzeugten Wellen zeigen ebenso wie die mit Dreielektrodenröhren erzeugten Schwingungen eine Abhängigkeit von den Betriebsdaten, nämlich von der an der Röhre angelegten Spannung, von der Größe der Emission und der Stärke des Magnetfeldes.

a) Senderanordnung

Der Sender, mit dem die Röhren im Magnetfeld untersucht wurden, bestand im wesentlichen aus einem System von drei Paralleldrähten für die Zuführung zu Kathode und Spannungselektrode, die mit einer gemeinsamen Abstimmungsplatte versehen waren. Da für das Zustandekommen der Schwingungen ganz bestimmte Winkel zwischen Röhrenachse und Magnetfeld notwendig waren, wurde der Ständer nach zwei Richtungen drehbar eingerichtet, um den Winkel, den die Röhrenachse mit den Feldlinien bildet, genau einstellen und messen zu können. Der verwendete Magnet gestattete es, Feldstärken bis zu 3000 Amp.-Wdg./cm zu erzeugen. Da die Schwingungen nur bei ganz bestimmten kritischen Feldstärken auftraten, wurde, um die Feldstärke des Magneten möglichst kontinuierlich zu verändern, ein großer Widerstandsatz verwendet, der eine stetige Stromstärkenänderung bis zu 20 Amp. gestattete.

b) Ergebnisse orientierender Messungen

Mit dieser Anordnung wurde versucht, einige der schon vermessenen Röhren mit Spiralenschwingungen auch im Magnetfeld zum Schwingen zu bringen. Die Anode, die jetzt überflüssig war, wurde meist isoliert. Nahezu alle Röhren, deren Gitterspiralen mit Anodenspannung ohne Magnetfeld erregt werden konnten, zeigten diese Schwingungen auch im Magnet-

feld. Ja die Röhren, die mit Anodenspannung allein nicht zur Erregung gebracht werden konnten, lieferten im Magnetfeld noch Schwingungen. Sogar Röhren mit nichtzylindrischer Spannungselektrode konnten in einigen Fällen auf diese Weise erregt werden. Später wurden dann noch einige Röhren speziell für die Untersuchung im Magnetfeld mit nur zwei Elektroden gebaut (Röhre Nr. 56). Die mit diesen Röhren gemachten Erfahrungen decken sich in allen wesentlichen Punkten mit den bei Röhren mit Spiralenschwingungen gemachten, so daß auf die Wiedergabe dieser Versuche verzichtet wurde.

Unter anderem wurden auch Versuche durchgeführt, die den Untersuchungen von Slutkin und Steinberg (9) entsprechen. Nach den gemachten Erfahrungen handelt es sich dabei um die Schwingungsanregung des von der Anoden- und Kathodenzuleitung gebildeten Lecherdrahtsystems. Gegenüber den Spiralenkreisschwingungen konnten aber dabei keine neuen Ergebnisse erzielt werden.

c) Messungen an der Röhre Nr. 221

Die mit der Röhre Nr. 221 (Dimension, vgl. Tab. 1) gemachten orientierenden Messungen über die Veränderlichen: den Winkel, der Magnetfeldstärke, der Spannung und der Emission, ihre Abhängigkeit voneinander und ihren Einfluß auf Energie und Wellenlänge ergaben folgendes Resultat:

Der Schwingbereich der Magnetfeldstärke war trotz Nachstellen aller übrigen Größen klein. Die günstigste Magnetfeldstärke war nahezu konstant. Der Schwingbereich des Winkels war stark von der Emission und der Spannung abhängig und war bei kleiner Emission und Spannung klein, bei großer Emission und hoher Spannung groß, etwa 12°. Der günstigste Winkel jedoch nahezu konstant. Der Schwingbereich der Spannung war ebenfalls groß (500 Volt). Der Schwingbereich der Emission schließlich zeigte sich stark von der Spannung abhängig. Er war bei kleiner Spannung klein und stieg mit wachsender Spannung. Die erzeugte Wellenlänge war nur wenig von den Betriebsdaten abhängig. Eine Wellenlängenänderung durch verschiedene Winkeleinstellungen konnte nicht festgestellt werden.

Die Wellenlängenänderung durch die Magnetfeldstärke war gerade noch zu messen. Bei einer Spannung von 500 Volt und einer Emission von 14 mA konnte die Magnetfeldstärke von 900—950 Amp.-Wdg./cm variiert werden. Die Wellenlänge war bei 900 Amp.-Wdg./cm 30,1 cm, bei 950 Amp.-Wdg./cm 29,7 cm. Die Wellenlänge wurde also mit zunehmender Feldstärke etwas kürzer.

Der bei allen Röhren gefundene charakteristische Zusammenhang zwischen Spannung und Emission ist in Fig. 15 bei einer nahezu konstanten günstigsten Feldstärke von 950 Amp.-Wdg./cm und dem günstigsten Winkel von 6° dargestellt. Das schraffierte Gebiet bezeichnet die Betriebsdaten $e_g - i_g$, bei denen Schwingungen auftreten. Die nahezu in der Mitte des Gebietes verlaufende Kurve $i_{g,\,\mathrm{opt}}$ bezeichnet die Betriebsdatenpaare, bei denen die im Kurvenblatt eingetragene Strahlleistung E maximal wird. Spannung und Emission nehmen gleich-

sinnig zu. Die kleinste Emission liegt unter 1 mA. Bei Anregung der gleichen Spirale mittels Anode war dagegen die Emission bei den günstigsten Betriebsdaten im zweiten Bereich wenigstens 5 mA. Das Schwinggebiet hat einen ganz anderen Charakter als das bei Dreielektrodenröhren. Charakteristisch ist somit der mit steigender Spannung sich trichterförmig erweiternde Emissionsbereich. Eine Fortsetzung des Bereiches nach größerer Spannung und größerer Emission ist durch das Labilwerden der Emission nicht möglich. Von einer Gitterspannung von etwa 400 Volt ab nimmt die Energie für die günstigste Emission nahezu linear zu.

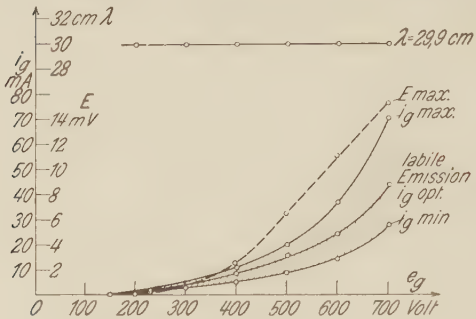

Fig. 15. Röhre Nr. 221. Spiralenschwingung im Magnetfeld. Grundschwingung. $\lambda = 29{,}9$ cm; e_g-, i_g-Schwinggebiet $E = f_1(e_g)$; $\lambda = f_2(e_g)$; bei i_g opt; H opt = 950 Amp.-Wdg./cm; $\sphericalangle = 6{,}0^0$ = const

Im ganzen Bereich von $e_g = 200$ bis 700 Volt ist für $i_{g,\,\mathrm{opt}}$ die Wellenlänge konstant = 29,9 cm. Sie ist genau so groß wie bei der Erregung der Spirale mittels Anodenspannung. Die Änderungen durch die Betriebsspannung sind unterhalb der Meßgenauigkeit.

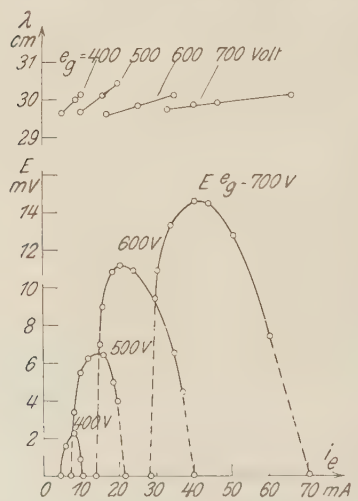

Fig. 16. Röhre Nr. 221. Spiralenschwingung im Magnetfeld. Grundschwingung. Schnitte e_g = const; $E = f_1(i_e)$; $\lambda = f_2(i_e)$; $H = 950$ Amp.-Wdg./cm; $\sphericalangle = 6{,}0^0$ = const

Bei etwas größerer Feldstärke (1050 Amp.-Wdg./cm) und einem etwas größeren Winkel von 10° konnte man eine zweite Welle von 18,6 cm erhalten, die man ohne Zweifel als Oberwelle des geschlossenen Drahtkreises ansprechen kann. Ohne Magnetfeld mit Anodenspannung gelingt die Erregung dieser Oberwelle nicht. Die Betriebsdaten für den Schwingungsbereich dieser Oberwelle liegen bei etwas höheren Werten als die entsprechenden für die Grundwelle. Die Anfangsemission liegt etwas höher, bei etwa 5 mA, der Emissionsbereich ist breiter. Die Wellenlänge ist ebenfalls im ganzen Spannungsbereich konstant.

In Fig. 16 sind Wellenlängen und Energien als Funktion der Emission bei verschiedenen Spannungen aufgetragen. Die Wellenlänge nimmt bei konstanter Spannung mit steigender Emission zu. Die maximale Änderung beträgt rund 3 Proz. Die Wellenlängenänderung durch die Emission nimmt

mit zunehmender Spannung ab. Bei dem gestrichelten Teil der Kurven sind die Schwingungen nicht stabil.

Vergleicht man die mit Zweielektrodenröhren im Magnetfeld gewonnenen Ergebnisse mit den bei Dreielektrodenröhren gewonnenen, so fällt als wesentlich auf, daß mit derselben Röhre in beiden Fällen etwa die gleiche Welle erzeugt werden kann. Die Betriebsdaten vermögen in beiden Fällen nur wenig die Wellenlänge des Schwingkreises zu verändern.

II. Zusammenfassende und theoretische Betrachtungen

1. Die zur Erregung kommenden Schwinggebilde

Wie aus den beschriebenen Messungen hervorgeht, wurden sowohl Schwinggebilde mit fester Eigenfrequenz, meist eine geschlossene Drahtspirale, als auch solche mit veränderlicher Eigenfrequenz (Lechersystem) zur Erregung gebracht.

Es wurde für alle Röhren mit geschlossenem Drahtkreis in erster Annäherung $\lambda \leqq L$ entsprechend dem gleichen experimentellen Befund von Grechowa (4) und den klassischen Berechnungen von Drude der Eigenfrequenzen von Drahtspiralen gefunden. Eine eingehende Nachprüfung der Eigenfrequenz des Lechersystems mit Endkapazität konnte zunächst nicht erfolgen, da hierzu noch spezielle Messungen bezüglich der Größe der vorhandenen Endkapazität notwendig gewesen wären.

2. Die für die Schwingungserzeugung charakteristischen Befunde

a) Der auftretende Anodenstrom

Sowohl die Röhren mit Lecherdraht- als auch die mit Spiralenkreisschwingungen zeigen bei stark negativer Anodenspannung (Röhre Nr. 185 noch bei $e_a = -100$ Volt) Anodenstrom. Bei den Röhren mit Spiralenschwingungen führt die Anode nahezu keine Wechselspannungen, so daß durch ein Positivwerden derselben der auftretende Anodenstrom nicht erklärt werden kann. Auf Grund der gemessenen Strahlleistung errechnet sich jedoch eine Wechselspannung auf der Gitterspirale von gleicher Größe. Man wird demnach annehmen können, daß ein Teil der das Gitter passierenden Elektronen durch diese die Energie bis zu 100 Volt aufnimmt um zur Anode zu gelangen.

b) Errechnete Laufzeiten und Schwingungsdauern

Errechnet man auf Grund des Potentialverlaufes zwischen den Zylinderelektroden der Röhren ohne Berücksichtigung der Wechselspannungen die Elektronenlaufzeiten und bezeichnet man mit T_1 die einfache Kathoden-Gitterlaufzeit, mit T_2 die einfache Laufzeit Gitter-

Umkehrfläche und mit T die Schwingungsdauer, so ergibt sich im wesentlichen für die untersuchten Röhren folgendes Resultat:

Die kurzeste Kathoden-Gitterlaufzeit T_1 weist die Röhre Nr. 241 mit Lecherdrahtschwingungen auf. T_1 variiert von 1—17 Proz. der Schwingungsdauer.

Bei Röhre Nr. 199, die ebenfalls zu Lecherdrahtschwingungen angeregt wurde, ergibt sich T_1 zu 41,5 Proz. Während also die Laufzeit bei Röhre Nr. 241 noch nicht vergleichbar mit der Schwingungsdauer ist, kommt bei den anderen Röhren die Laufzeit schon nahe an $T/2$ heran.

Bei den Röhren mit Spiralenschwingungen ist T_1 im Mittel ebenfalls 40 Proz. der Schwingungsdauer. Bei den größeren Typen ist außerdem T_1 in ziemlich weiten Grenzen bei Röhre Nr. 199 von 30 bis 71 Proz. der Schwingungsdauer zu variieren.

Der Zusammenhang zwischen T_2 und T bei der Röhre Nr. 241 geht aus den Tabellen 2 und 3 hervor. In Tab. 2 sind für die beiden Wellenlängen mit optimaler Energie $\lambda = 45$ cm und $\lambda = 19$ cm für extreme bzw. optimale Spannungspaare e_g und e_a T_1, T_2 und T angegeben. Legt man für $\lambda = 45$ cm die Beziehung $2\,T_2 = T$ und für $\lambda = 19$ cm die Beziehung $T_2 = T$ zugrunde, so ist unter ΔT Proz. die prozentuale Abweichung der auf Grund der Formeln gewonnenen Werte von den in der Tabelle angegebenen zu verstehen. Man sieht, für das optimale Spannungspaar $e_g = 320$ Volt und $e_a = -32$ Volt ist der Fehler bei $\lambda = 45$ cm unter 1 Proz. Bei $\lambda = 19$ cm und e_g optimum etwa 400 Volt und $e_a = -75$ Volt 5 Proz. Die größten Abweichungen betragen im ersten Falle 20 Proz., im zweiten 9 Proz.

Tabelle 2

Röhre Nr. 241

λ cm	e_g Volt	e_a Volt	10^{-10} sec T_1	T_2	T	ΔT %	Bildungsges.
45,0	320	−32	1,23	7,55	15,0	< 1	$2\,T_2 = T$
45,0	100	−50	2,53	7,75	15,0	+ 4	
45,0	850	+13	0,75	6,12	15,0	−18	
45,2	320	−10	1,23	9,1	15,07	+20	
41,5	320	−60	1,23	6,73	13,8	− 2,5	
19,0	180	−85	1,64	5,94	6,32	− 6	$T_2 = T$
19,0	400	−75	1,1	6,0	6,32	− 5	
19,0	600	−45	0,9	6,05	6,32	− 4	
19,0	800	−25	0,78	5,73	6,32	− 9	

Tabelle 3

Röhre Nr. 241

λ cm	e_g opt. Volt	$-e_a$ opt. Volt	10^{-10} sec T_1	T_2	T	ΔT %	Bildungsges.
28,8	700	100	0,83	4,85	9,6	+1	$2\,T_2 = T$
33,7	640	60	0,87	5,6	11,2	0	
40,1	490	38	0,99	6,55	13,4	−2	
46,0	330	27	1,2	7,95	15,3	+4	
54,0	240	24	1,42	9,4	18,0	+4,5	
60,0	140	17	1,85	10,5	20,0	+5	

In Tab. 3 sind für verschiedene Wellenlängen der Röhre Nr. 241 bei den günstigsten Betriebsspannungen T_1 T_2 und ΔT aufgetragen. ΔT bleibt von $\lambda = 28{,}8$ cm bis $\lambda = 60$ cm unter 5 Proz. Bei der nur ungenau vorzunehmenden Bestimmung der Röhrenabmessungen bedeutet dies eine sehr gute Übereinstimmung mit den aufgestellten Beziehungen.

Rechnet man auf Grund der e_g-, e_a-Bereiche für die Röhre Nr. 199, die Spiralenschwingungen mit zwei Bereichen aufweist, die Laufzeiten T_1 und T_2 aus, so zeigen sich andere Gesetzmäßigkeiten. In Tab. 4 sind für extreme bzw. optimale Betriebsdaten die errechneten Werte zusammengestellt. Legt man für den ersten Bereich die Beziehung $T_1 + T_2 = \mathrm{T}$ zugrunde, so ergibt sich ein ΔT im ungünstigsten Falle von 13—19 Proz.; bei optimalen Betriebsdaten beträgt der Fehler etwa 3 Proz. Für den zweiten Bereich scheint T_2 mit der Schwingungsdauer übereinzustimmen. Der Fehler ΔT ist wenigstens nur bei dieser Annahme klein.

Tabelle 4

Röhre Nr.	e_g Volt		$-e_a$ Volt		10^{-10} sec T_1	T_2	T	ΔT %	Bildungsges.
199	250	min.	275	opt.	5,82	5,5	10	+13	
	600	opt.	199	„	3,75	6,65	10	+ 4	
I. Ber.	900	< max.	105	„	3,07	6,6	10	− 3	$T_1 + T_2 = \mathrm{T}$
	600	opt.	250	max.	3,75	6,04	10	− 2	
	600	„	140	min.	3,75	7,43	10	+12	
	175	min.	90	opt.	6,97	8,3	9,87	−12	
II. Ber.	400	opt.	50	„	4,6	10,65	9,87	+ 8	$T_2 = \mathrm{T}$
	565	< max.	0	„	3,86	10,7	9,87	+ 8,5	

Tabelle 5

Röhre Nr.	λ cm	e_g Volt	$-e_a$ Volt	10^{-10} sec T_1	T_2	T	$l T_1 + m T_2$	n T	Bildungsges.
199	130	180	0	6,86	18,9	43,3	51,5	43,3	$2T_1 + 2T_2 = \mathrm{T}$
	120	400	0	4,6	12,7	40,0	34,6	40,0	
	70	400	136	4,6	8,0	23,3	25,2	23,3	$2T_1 + 2T_2 = \mathrm{T}$
	52,5	160	58	7,3	12,3	17,5	19,6	17,5	$T_1 + T_2 = \mathrm{T}$
	40,0	240	130	5,95	8,32	13,3	14,3	13,3	$T_1 + T_2 = \mathrm{T}$
	30,0	600	200	3,75	6,65	10,0	10,4	10,0	$T_1 + T_2 = \mathrm{T}$
	29,7	400	50	4,6	10,65	9,87	10,65	9,87	$T_2 = \mathrm{T}$
184	43	195	25	4,48	10,4	14,3	14,88	14,3	$T_1 + T_2 = \mathrm{T}$
	32	280	80	3,75	7,0	10,7	10,75	10,7	$T_1 + T_2 = \mathrm{T}$
	24,4	450	143	3,0	5,34	8,15	8,34	8,15	$T_1 + T_2 = \mathrm{T}$
	24,3	320	4	3,53	9,67	8,12	26,4	24,24	$2T_1 + 2T_2 = 3\mathrm{T}$
240	45,0	320	32	1,23	7,55	15,0	15,1	15,0	$2T_2 = \mathrm{T}$
	19,0	600	45	0,9	6,05	6,32	6,05	6,32	$T_2 = \mathrm{T}$
168	12,6	400	375	1,6	2,9	4,2	4,5	4,2	$T_1 + T_2 = \mathrm{T}$
	12,6	350	150	1,7	4,8	4,2	13	12,6	$2T_1 + 2T_2 = 3\mathrm{T}$
	12,6	325	50	1,77	8,12	4,2	19,8	21,0	$2T_1 + 2T_2 = 5\mathrm{T}$
	12,6	300	0	1,85	10,3	4,2			

Die Tab. 5 enthält schließlich eine Zusammenstellung von gemessenen Wellenlängen, Spannungen und berechneten Laufzeiten; dabei sind nur die energiestärksten Schwingungen aufgeführt. Die dazu angegebenen Gitter- und Anodenspannungen sind die für die Wellenlänge günstigsten. Ferner ist jeweils versucht worden, eine Beziehung zwischen den Laufzeiten und der Schwingungsdauer herauszufinden. Bei der Röhre Nr. 199 zeigte sich für die Wellen von $\lambda = 130$, 120 und 70 cm die sogenannte Barkhausenbeziehung erfüllt, d. h. die Gesamtlaufzeit für Hin- und Hergang stimmt annähernd mit der Schwingungsdauer überein. Bei den übrigen Röhren konnte diese Beziehung nicht gefunden werden. Die Röhrenabmessungen waren hier kleiner, das Gitter grobdrähtiger. Für die kürzeren Wellen der Röhre Nr. 199 sowie für die der Röhre Nr. 184 wurde fast durchweg die Beziehung $T_1 + T_2 = \mathsf{T}$ gefunden. Den Spiralenschwingungen der Röhre Nr. 168 mit konstanter Wellenlänge $\lambda = 12{,}6$ cm läßt sich eine Beziehung von der Art

$$2\,T_1 + 2\,T_2 = n\,\mathsf{T}$$

zuordnen Für n wurden dabei die Werte 2, 3 und 5 gefunden.

3. Die auftretenden Wellenlängenänderungen durch die Betriebsdaten

a) Die Abhängigkeit von der Emission

Die von Hornung (7) gemessene Abhängigkeit der Wellenlängen von der Emission, die von K. Kohl erklärt wurde als der Einfluß der Raumladungen auf die Betriebskapazität im Sinne eines Elektronengasdielektrikums mit einer Dielektrizitätskonstanten $\varepsilon < 1$, konnte bei den vorliegenden Untersuchungen nicht mit Sicherheit festgestellt werden. Die hier gemessene Abhängigkeit der Wellenlänge von den Betriebsspannungen war jedenfalls bedeutend größer, so daß die gemessene Emissionsabhängigkeit wahrscheinlich anders zu erklären ist, insbesondere deshalb, da in einigen Fällen (Fig. 10) sogar eine Zunahme der Wellenlänge mit der Emission festgestellt wurde. Möglicherweise lassen sich diese Beobachtungen durch eine Kopplung der schwingenden Raumladung mit dem Schwingungssystem erklären. Der Umstand, daß bei positiver Anode nahezu keine Wellenlängenänderung durch die Emission eintritt, spricht ebenfalls dafür, daß die bloße Anwesenheit von Elektronen nicht genügt, um die Welle zu ändern.

b) Die Abhängigkeit von den Spannungen

Wie aus den Messungen in Fig. 4 hervorgeht, tritt bei Röhren, bei denen die Laufzeit T_1 keine Beziehung zur Schwingungsdauer aufweist, auch keine Wellenlängenänderung durch e_g ein, wenn man nur dafür sorgt, daß e_a für das Energieoptimum eingestellt ist.

Am größten ist im allgemeinen die Wellenlängenänderung durch die Anodenspannung. Mit wachsender negativer Anodenspannung verkürzt sich die Wellenlänge, was durch die damit verbundene Laufzeitverkürzung der Elektronen verständlich wird. Wie aus den Kurven in Fig. 6 hervorgeht, ist die Wellenlängenänderung durch die Emission bei der Röhre Nr. 241 dann nahezu gleich Null, wenn die Anodenspannung auf das Energieoptimum eingestellt ist. Die Wellenlängenänderung wird groß bei geänderten Betriebsdaten, besonders bei stark negativer Anodenspannung. Es scheint dies ein Beweis dafür zu sein, daß die Schwingung durch ein aus Raumladung und Schwinggebilde gekoppeltes System bedingt ist, da bei hoher Emission die Frequenzänderung viel stärker ist, als es durch eine bloße Kapazitätsänderung der Fall sein dürfte.

Kohl (11) gibt für die Wellenlängenänderung noch eine zweite Ursache als Erklärung an, nämlich die phasenunrichtige Erregung des Schwingungsgebildes durch die Elektronenbewegung bei nicht optimal gewählten Betriebsdaten.

4. Die Schwingungen im Magnetfeld

Experimentell zeigen die Schwingungen mit zusätzlichem Magnetfeld ein ganz ähnliches Verhalten wie die Schwingungen im Drei-Elektrodenrohr. Man wird auch in theoretischer Hinsicht sie unter den gleichen Gesichtspunkten einordnen. Auch hier hat man es wie im vorliegenden Fall mit mehr oder weniger gut definierten Schwinggebilden zu tun, bei denen die erregte Frequenz durch die auftretenden Raumladungen mitbeeinflußt ist.

Zusammenfassung und Schluß

In dieser Arbeit ist an Hand eines umfangreichen Röhrenmaterials versucht worden, die Ergebnisse von Barkhausen und Kurz (1), Gill und Morrel (2), Scheibe (3), Potapenko (8), K. Kohl (5) und Hollmann (6) zu bestätigen und zu erklären. Auf der theoretischen Grundlage raumladungs-beeinflußter Schwingungssysteme können die gefundenen Erscheinungen erklärt werden.

Zum Schluß möchte ich Hrn. Prof. Gudden für Überlassung von Hilfsmitteln und manch wertvollen Rat danken. Dank gebührt vor allem der Helmholtzgesellschaft und der Firma Süddeutsche Telefon-Apparate-Kabel und Drahtwerke, für zur Verfügung gestellte Hilfsmittel. Besonderen Dank schulde ich sodann Hrn. Privatdoz. Dr. Karl Kohl, unter dessen Leitung und Beratung die Arbeit durchgeführt wurde.

Literaturverzeichnis

1) H. Barkhausen u. K. Kurz, Phys. Ztschr. **21**. S. 1. 1920.
2) E. W. B. Gill u. J. H. Morrel, Phil. Mag. **42**. S. 265. 1921.
3) A. Scheibe, Ann. d. Phys. **73**. S. 54. 1924.
4) M. T. Grechowa, Ztschr. f. Phys. **35**. S. 50. 1926.
5) K. Kohl, Ann. d. Phys. **85**. S. 1. 1928.
6) H. E. Hollmann, Jb. d. drahtl. Telegr. **33**. S. 128. 1929.
7) H. Hornung, Ann. d. Phys. [5] **1**. S. 417. 1929.
8) G. Potapenko, Ztschr. f. techn. Phys. **10**. S. 548, 1929.
9) A. Slutkin u. D. Steinberg, Ann. d. Phys. [5] **1**. S. 658. 1929.
10) M. J. O. Strutt, Ann. d. Phys. [5] **4**. S. 17. 1930.
11) K. Kohl, Ergebnisse der exakten Naturw. **9**. S. 275. 1930.

Ausführliche Literaturangaben befinden sich in der zuletzt angeführten Arbeit von K. Kohl.

Lebenslauf

Ich, Hugo Collenbusch, wurde am 30. März 1905 zu Ihmerterbach i. Westf. als Sohn des Kaufmanns Walter Collenbusch und seiner Ehefrau Wilhelmine geboren. Vom 6.—10. Lebensjahr besuchte ich die Volksschule in Elberfeld und Nürnberg und anschließend 6 Jahre die Kreisrealschule in Nürnberg. Daraufhin verbrachte ich 2 Jahre als Technikumslehrling in der Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg in Nürnberg und bezog im Herbst 1923 die Höhere Technische Staatslehranstalt in Nürnberg. Nach einem Studium von $1^1/_2$ Jahren trat ich im Frühjahr 1925 zur Oberrealschule in Nürnberg über und machte im darauffolgenden Jahr die Reifeprüfung. Das erste Hochschulsemester verbrachte ich an der Technischen Hochschule, das zweite an der Universität in München; die folgenden sieben Semester an der Universität Erlangen. Vom 6. bis 9. Semester arbeitete ich an der Doktorarbeit in Erlangen. Ich besitze die bayerische Staatsangehörigkeit.